

车载式隧道检测系统方案介绍

2020年3月

1.项目背景

2019年5月，在国际隧道协会举办的第45届世界隧道大会上，一套亮眼的隧道检测设备获得了2019年度科技产品/设备创新奖，这次世界大会专注的技术关键字是长深隧道和地下工程施工安全。获奖项目由意大利铁路公司和国家公路管理局申报，完成项目的研发单位是徕卡公司和意大利ADTS公司。



图1 - 中国媒体隧道建设报道的获奖内容及项目照片

在该获奖项目中，意大利ADTS公司设计和制造了车载式铁路隧道综合检测系统，以下基于该设计方案，介绍该隧道检测系统的基本组成、系统集成、功能模块以及缺陷分析软件等。

2.隧道检测系统方案

本方案是铁路隧道检测设备的设计和集成方案，用于检测用户管内的各种类型隧道（包括单线和复线隧道），检测设备安装在用户的铁路车辆上，可安装的车辆包括：轨道车和平车等，车辆配有电力供应。检测车辆运行时，一次通过隧道即可完成全部数据采集、数据显示和数据处理工作，并可以配合人工智能（AI）软件，按照用户建立的标准自动筛选缺陷。

检测系统采用模块化设计，包括：车辆定位/同步触发模块、隧道衬砌表面检测模块、隧道廓形和铁路限界检测模块、钢轨轮廓和轨道基准检测模块、车辆运动姿态补偿（惯导）模块以及隧道表面温度检测模块（选项）等，所有模块的数据都基于里程信息无缝集成在一起。

检测速度：0 - 30 公里/小时

环境条件：-40 到 50 度 全天候检测

设备保护等级：IP65

供电功率：15 KW

2.1 隧道衬砌表面缺陷类型和分类标准

隧道衬砌表面存在的主要缺陷包括：混凝土衬砌阴湿、渗漏水、层间缝、结构错台缝隙、蜂窝、衬砌表面脱落和破损、出现的水波纹和水泡、表面麻点和返砂、剥离掉块、细微裂缝、贯穿裂缝、密集裂缝以及表面状态不均匀等等。

针对隧道缺陷类型的多样性和复杂性，意大利铁路公司 RFI 制定了一套隧道缺陷类型和缺陷等级管理标准。这是一步非常有意义的工作，为隧道安全管理规范和养护维修的标准化奠定了基础。

本技术方案提出检测设备生产厂家协助用户建立和完善全面的隧道缺陷管理标准，并根据隧道缺陷管理标准实施相关的维修细则。



图 2 - 意大利铁路对隧道表面缺陷的分类和管理标准

2.2 隧道衬砌表面检测模块组成

隧道衬砌表面检测模块主要由光学扫描成像单元和 LED 照明单元组成，用于完成对隧道衬砌表面的图像采集。

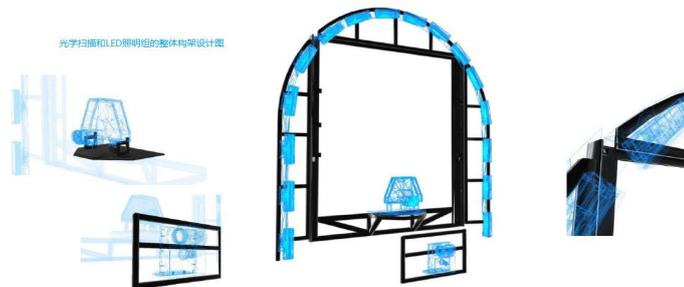


图 3 - 隧道衬砌表面检测模块设计构造图

通过接收同步和触发单元的触发信号，所有光学传感器同步启动采集工作。由于隧道衬砌表面检测模块与其它检测模块是无缝集成，因此检测系统输出的图像数据显示为一张整个隧道的展开图，图上中各个像素信息同时配有隧道轮廓尺寸和里程信息。用户可在图像上测量隧道表面设施和缺陷的二维尺寸，另外，采集的图像也不会因为相机和隧道壁间距离变化而变化图片尺寸比例。

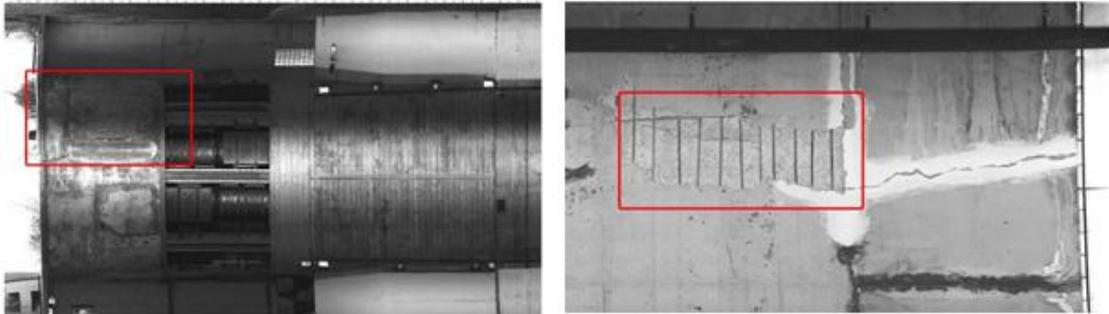


图 4 扫描单元采集的原始图像放大后的品质

隧道衬砌表面检测模块的整体机械设计为框架式钢结构，传感器和照明组等部件安装的位置精度为 1mm，需要根据用户铁路车辆（包括机车、轨道车、平车或用户的其它专用车辆）的具体尺寸定制设计。安装构架采用焊接工艺制造，检测部件在焊接结构上通过专用螺栓连接，坚固稳定，保证车辆在 80km/小时速度下运行状态的安全性。



图 5 - 检测模块在轨道车上的安装图片

2.3 衬砌二维展开图的采集

隧道衬砌表面检测模块中的光学扫描成像单元用于采集隧道衬砌表面图像，内部集成了线扫描相机传感器以及成像控制设备等。当检测检车车辆行驶到隧道口，检测单元会自动启动采集工作，一次通过隧道即完成数据采集和显示，即便针对复线隧道，也不需要反复检测。

参数	性能
扫描精度	1 mm
采样间隔	1 mm
相机像素	6k/8k
检测速度	0-30 km/h
适合检测距离	0.5 – 12 米
LED 照明组 (数量)	16

光学扫描和成像单元以及 LED 照明组的详细参数和尺寸将按照用户隧道的类型及用户采用的车辆细节进行详细设计。

LED 照明组安装在隧道衬砌表面检测模块的整体构架上，针对大多数典型的隧道尺寸，标准照明组的数量为 16 个。每个照明组采用厂家专用的高性能和高功率的 LED 照明体，通过光学聚焦设计和机械结构组合成一体，LED 照明组为扫描相机提供亮度度适合照明光环，并根据相机的感光要求，自动调节照明亮度，保证了车辆在行驶过程中采集相机能够输出高度清晰的隧道衬砌图像。



图 6 – 检测车辆在采集作业时的照片

检测模块通过接收同步/触发单元的同步信号，实时采集和显示整个隧道衬砌的二维展开图像，专业的算法软件将各个相机采集的图像实时集成在一起，形成一张沿隧道中心的展开图像，方便用户浏览和分析。

用户可以对展开图进行放大、缩小、镜像、改变方向和角度等操作，并可以在展开图像上完成各种测量工作，例如长度、宽度以及面积的测量等。隧道二维展开图为一张黑白图像，图像品质可以清晰分辨隧道渗水、阴湿、掉块以及裂纹等表面缺陷的状态。展开图横轴上配有隧道的公里标信息。

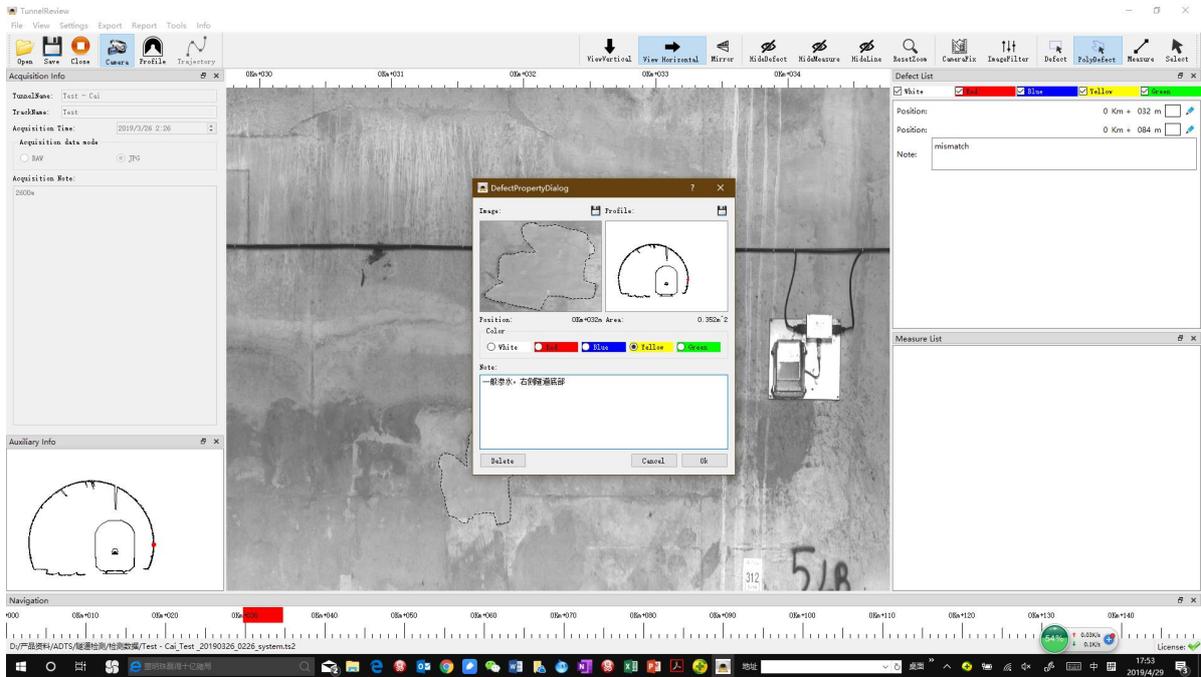


图 7 - 隧道衬砌表面分析软件界面

在隧道衬砌展开图上，用户可以自行选择和定义缺陷边界，并自动计算缺陷参数，包括：长度、宽度和面积，例如：

- 衬砌表面渗水的位置和面积；
- 衬砌表面裂纹的长度和宽度；
- 衬砌表面状态不均匀的位置和面积等；

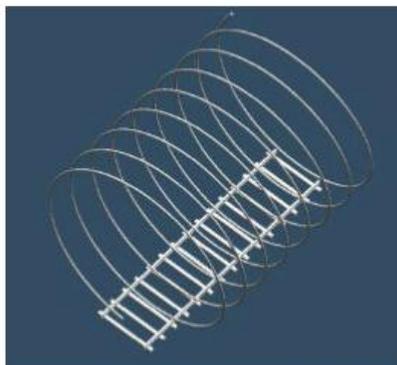
2.4 隧道廓形和铁路限界检测模块

隧道廓形和铁路限界检测模块用于检测隧道廓形尺寸和限界状态，检测数据基于轨道中心。轨道中心的坐标通过线路基准检测模块中的钢轨轮廓检测结果取得，并由惯性导航模块补偿车体运动姿态引入的误差。因此，检测系统排除了所有动态干扰因素，输出的报告为以线路中心为基准的静态检测报告。

2.4.1 激光轮廓仪

本技术方案采用目前国际上最先进的 200Hz 激光轮廓仪，通过计算激光发射到接收时的相位差达到测量隧道轮廓尺寸的目的。

激光轮廓仪每秒的扫描效率超过 100 万个点，最大旋转扫描速度为 200 断面/秒。这样，即使车辆在一定高的速度行驶的情况下，也能实现采样间距最小化。同时，鉴于轮廓仪高密度的激光发射点，最终可得到的清晰的隧道轮廓图形。



车辆速度	隧道轮廓扫描间隔
车辆速度 5 km/h	6.9 mm
车辆速度 10 km/h	13.8 mm
车辆速度 20 km/h	25.6 mm
车辆速度 30 km/h	41.6 mm

图 8 – 激光轮廓仪的检测原理

激光轮廓仪采用的激光等级为 1 级，符合城市环境中使用的相关标准。轮廓仪可与车辆定位和同步触发系统集成，支持像素到像素的同步方式，因此，所有采集数据的位置和方向都可以明确，为检测数据转换到三维图像数据以及 VR 实景数据奠定了基础。



图 9 – 激光轮廓仪的各种车辆安装图片

激光轮廓仪的技术参数表	
激光等级	1 级 (符合标准根据 EN60825-1/ANSI Z 136.1)
波长	635 nm
脉冲持续时间	185 μ s
重复率	49 Hz
峰值输出功率	< 6 mW
光束发散	< 0.5 mrad
光束直径	1.9 毫米 (距离 0.1 米)

激光轮廓仪的技术参数表			
检测距离	119 m		
数据采集率	最大 1016000 像素/秒		
线性误差	≤ 1 mm		
-10 到 45 度范围漂移	< 2 mm (不配基准) < 0.3 mm (配基准)		
-10 到 45 度全程准确性	≤ 1 mm		
目标距离	白色 80%	灰色 37%	黑色 14%
1 sigma 噪声 0.5m			
1 sigma 噪声 1m	0.5 mm	0.6 mm	1.0 mm
1 sigma 噪声 2m	0.3 mm	0.5 mm	0.8 mm
1 sigma 噪声 5m	0.3 mm	0.4 mm	0.6 mm
1 sigma 噪声 10m	0.2 mm	0.3 mm	0.5 mm
1 sigma 噪声 25m	0.4 mm	0.6 mm	1.1 mm
1 sigma 噪声 50m	0.9 mm	1.4 mm	3.1 mm
反射旋转单元	完全密封的旋转棱镜		
垂直视野	360 度无障碍		
角度分辨率	0.0088°		
角度精度	0.02° rms		
旋转速度	200Hz		

2.4.2 隧道轮廓的显示和分析

隧道廓形和铁路限界检测模块可实时显示和分析隧道轮廓数据，并对比用户局管隧道的建筑限界、运行限界以及车辆限界，报告各种铁路设施的状态，一旦出现超限的情况，实时报警。

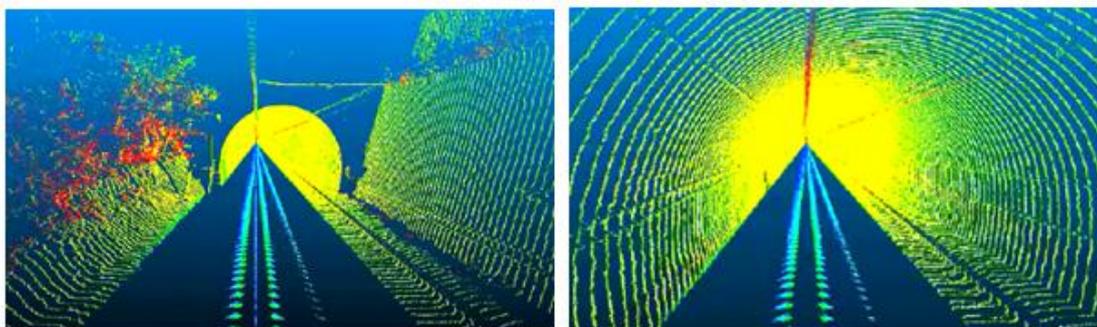


图 10 – 限界和隧道廓形检测数据图展示

本方案中的隧道廓形数据和衬砌表面图像是完全集成管理的，用户在分析隧道轮廓缺陷（超限、尺寸变形）时，可方便地参考与这些数据同步的隧道表面图像，了解这些设施侵入限界的原

因。也可以在分析隧道衬砌表面状态的时候，了解隧道表面设施的尺寸和大小。

分析软件同时展示隧道衬砌展开图和隧道轮廓尺寸图，隧道衬砌展开图中的每个部位对应着隧道轮廓的尺寸数据，同时，隧道轮廓尺寸上的每个部位也对应着衬砌表面展开图中的图像。

用户可通过录入隧道建筑限界或车辆限界等 CAD 格式的文件（尺寸图），建立限界标准，软件会自动将检测数据与限界尺寸标准进行对比分析，由于检测数据的基准为轨道中心，即为静态检测数据，因此，对比的结果真实，误差小，并实时报警超限位置。

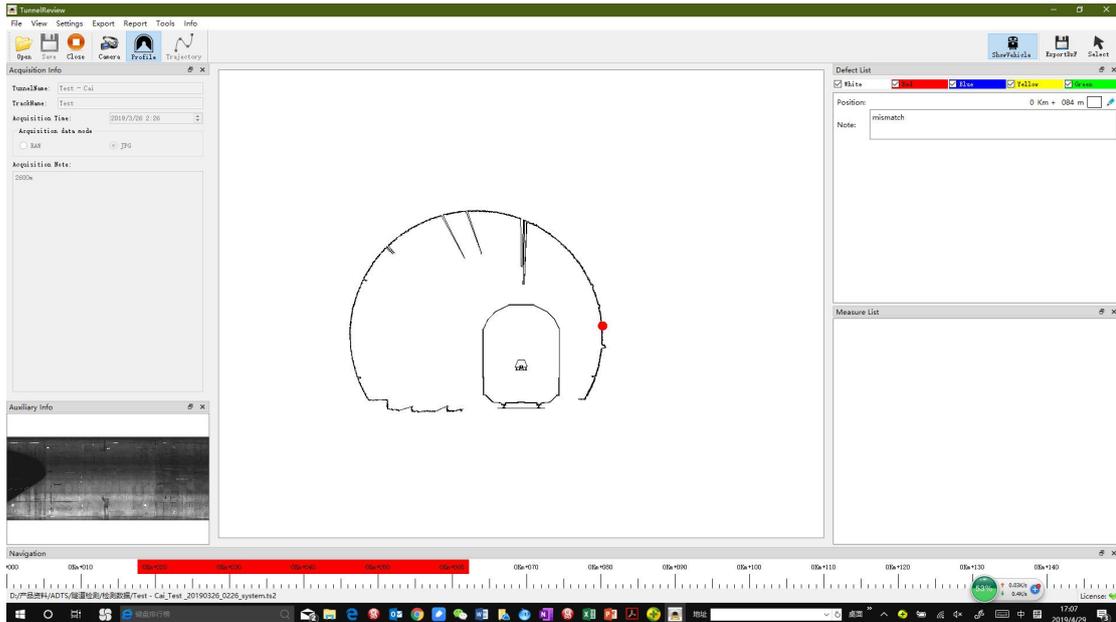


图 11 – 轮廓和限界检测分析软件界面

所有检测数据和分析报告都配有里程信息，即每个隧道廓形和衬砌展开图的每个位置都配有对应的里程信息，用户可通过输入里程信息快速浏览隧道关键部位的数据信息。

2.5 钢轨轮廓和轨道基准检测模块

为了得到绝对的隧道尺寸检测数据即隧道尺寸的静态数据，必须有一个基准点，该基准点即为“轨道中心”，轨道中心是轨距的中点。同时，检测数据也要补偿线路的轨底坡和超高，以静态检测的标准，提供隧道廓形数据。

钢轨轮廓和轨道基准检测模块即用于检测轨道中心，为所有检测数据提供基准点坐标。该模块通过检测钢轨轮廓得到轨顶点和轨距点的坐标，并配合“惯导模块”，补偿车辆动态运动带来的检测误差。

检测模块安装在车体和靠近隧道检测模块的车轮处，用于采集轨头廓形，并计算轨头廓形中轨顶点和轨距点的坐标。该模块采用三角测量检测原理通过激光和相机采集钢轨廓形数据，采用的相机为高速工业面阵相机，激光为 450NM 蓝激光。检测模块详细的安装方式根据用户的车辆设计，配有防光线干扰和适合铁路应用的安全保护罩。

该模块的检测数据仅用于向隧道检测系统提供轨道基准，用户可选择是否要利用该模块的钢轨轮廓检测数据，否则不向用户提供用于分析钢轨廓形和钢轨磨耗的专用软件。

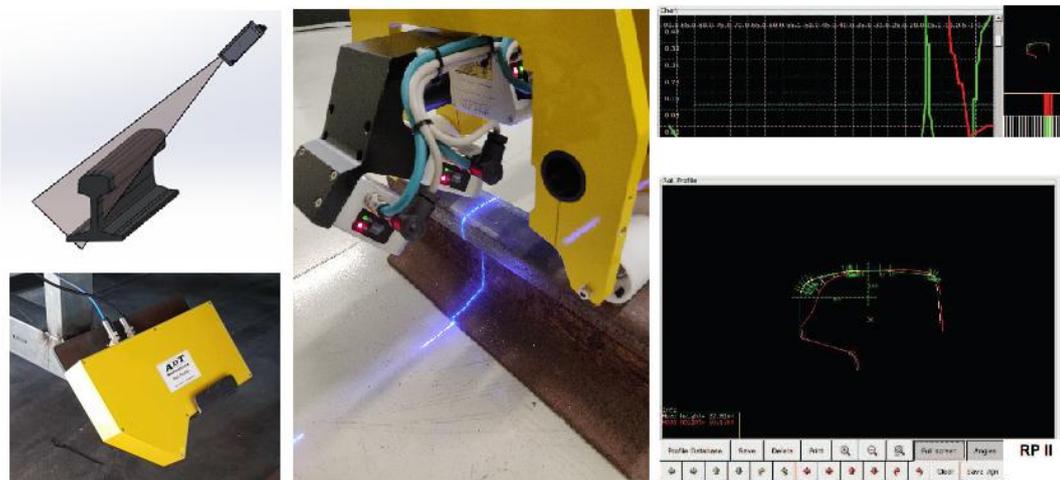


图 12 - 钢轨轮廓和轨道基准检测模块的组成和安装

2.6 车辆运动姿态检测(惯导)补偿模块

车辆运动姿态检测模块为光纤捷联惯性基准系统，由闭环光纤捷联惯性测量单元和高性能处理和存储组件组成，可实时提供高精度的位置和姿态信息，用于补偿车辆运动带来的检测误差。

技术特点：

- 高精度、体积小、重量轻；
- 采用闭环光纤陀螺为核心部件；
- 内嵌大容量存储器，具备位置和姿态信息的实时处理功能；

准备时间		正常对准 GC: 8 分钟
精度	位置	C/A GPS 组合: 4-6m RTK 组合: 0.1-0.3m 事后处理: 0.05-0.3m
	速度	C/A GPS 组合: 0.05m/s RTK 组合: 0.01m/s 事后处理: 0.005m/s
	航向	C/A GPS 组合: 0.03 ° RTK 组合: 0.02 ° 事后处理: 0.005 °
	姿态	C/A GPS 组合: 0.005 ° RTK 组合: 0.005 ° 事后处理: 0.0025 °

测量范围	角速度	±400 °/s
	加速度	±12g (正常)
环境条件	温度	工作: -40 - +70°C
		存储: -55 - +85°C
可靠性		6000h
电源功率		28VDC/20W
接口		RS-422; RS-232; LAN
尺寸		180 X 180 X 150 mm
重量		小于 5kg

该模块的检测数据仅用于向隧道检测系统提供车辆运动姿态补偿，用户可选择是否要利用该模块的车辆运动姿态检测数据，否则不向用户提供用于分析车辆运动姿态的专用软件。

2.7 隧道衬砌表面温度检测（选项）

隧道衬砌表面温度的变化，往往与隧道衬砌表面的阴湿、渗水、和结冰等现象相关，因此，用户可选择在隧道衬砌表面图像扫描模块中集成隧道衬砌温度检测模块，从而得到隧道表面的温度图谱。

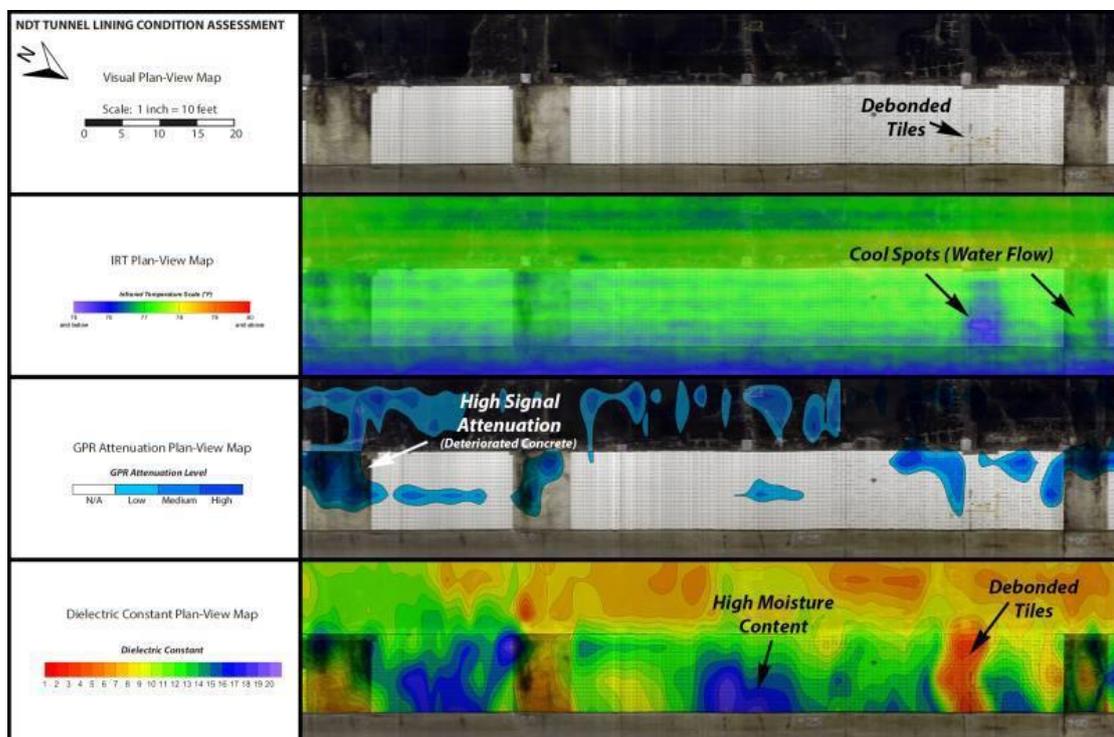


图 13 – 隧道衬砌表面温度变化检测图谱

【注释】配备温度检测系统后，检测速度应降低至 15 公里/小时。

温度检测的图谱数据可与隧道衬砌表面的图像数据对应并集成在一起。数字型的温度图谱可方便用户设定缺陷管理的阈值，隧道衬砌表面温度超出阈值的位置在图谱上会增强显示 (如上图)，通过与隧道衬砌表面图像的对比，可快速锁定阴湿、渗水等表面缺陷位置，也可以掌握隧道其它应用设施的温度状况。

3. 检测车辆的车内布置

根据用户选择的车辆，如果空间可以的话，可配置车内操作和分析室。操作室内配有三个标准机架，分别是电源和控制机架、隧道表面检测机架和隧道轮廓尺寸检测机架，机架内配有不间断电源和传感器控制设备、网络数据传输设备以及处理和分析服务器 PC 等。

机架旁配有操作台，隧道检测系统的传感器、照明组以及电源、机架和操作台之间由电缆连接，室内电缆布置在车辆地板内的电缆槽中，室外露出部分采用套管和螺纹管保护并固定在车体上。

操作台上配置二个 27 英寸显示器和相关 PC 的鼠标键盘等，分别显示各个检测系统的实时检测数据。工作间配有一个大屏，显示实时的图像数据。

4. 软件报告和人工智能模块

车载式隧道检测系统配有车上数据分析软件，该软件为意大利 ADTS 公司开发，已经应用于意大利铁路和公路管理局。该软件能够综合管理所有传感器并完成同步、触发、显示、数据处理、数据集成和数据分析工作，最终为用户提供符合管理要求的检测报告。

4.1 车载软件总体分为采集和分析两个部分。采集部分用于实时显示传感器的检测数据，将各种数据进行综合处理和集成，实时输出处理结果。对于隧道尺寸和温度等超限的部分，软件具备实时报警功能。

4.2 车载软件可将各个图像传感器的数据完整地集成在一起，最终展示给用户一张完整的隧道衬砌表面展开图。

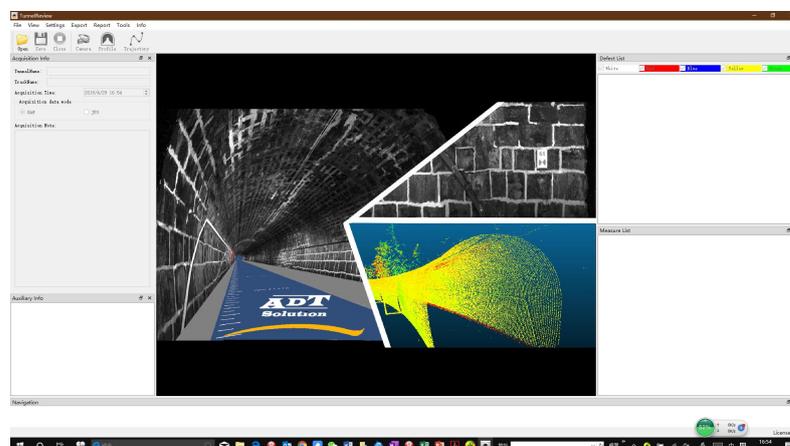


图 14 - 隧道分析软件界面

4.3 在隧道图像展开图中，用户可任意定义、标记、计算隧道表面缺陷。缺陷的管理分为四级，软件会自动将用户定义的缺陷用规定的颜色区分开来。

4.4 所有类型的缺陷都配有里程定位信息，里程信息的格式为：

□□□□km + □□□□m

4.5 软件采用主界面和辅助界面的形式同时显示隧道衬砌展开图和隧道轮廓尺寸数据图形，当用户用鼠标点击隧道衬砌展开图上某一位置时，该位置对应的隧道轮廓图形上会显示一个红色标记。该功能让用户方便地了解衬砌表面缺陷在隧道廓形上的位置。

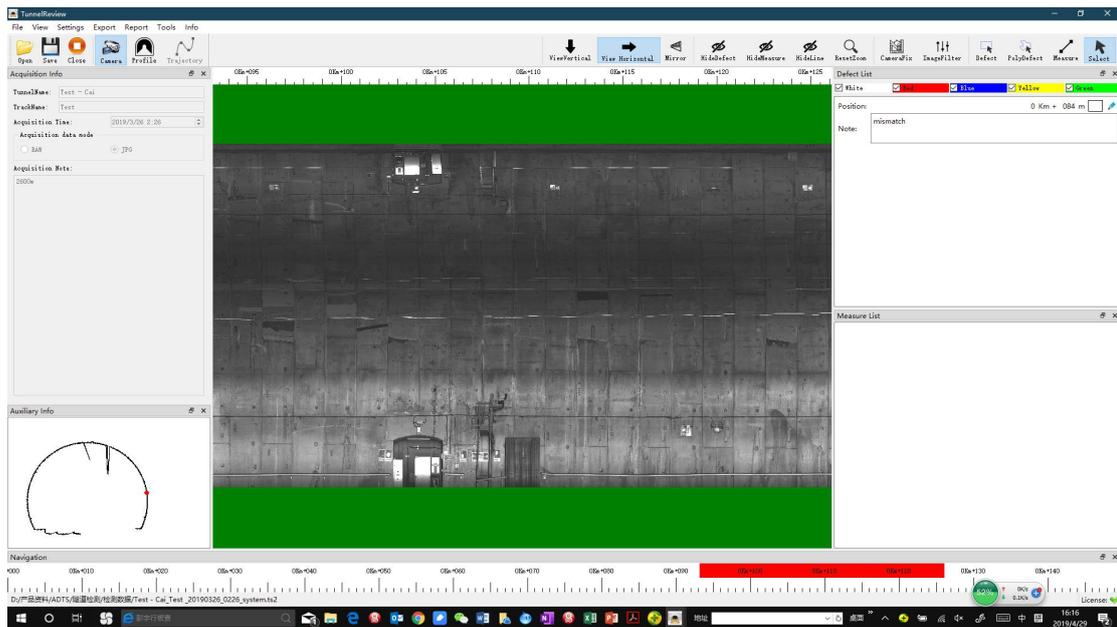


图 15 – 隧道展开图和轮廓数据的分析界面

4.6 用户可通过引入 CAD 格式的隧道标准廓形图实现检测数据（轮廓）与标准轮廓的对比，掌握隧道的尺寸状态，例如超挖和欠挖等。

4.7 通过建立 CAD 格式的用户车辆限界模板，软件会自动分析检测的隧道轮廓与限界的对比情况，并将超限的区间筛选出来，提供用户缺陷报告。

4.8 用户通过按下图像数据转换按钮，软件会自动切换到图像数据，用户可以通过界面上功能操作按钮完成以下操作：

- 浏览衬砌表面展开图；
- 衬砌表面图像的放大和缩小；
- 隧道壁展开图亮度和对比度调节；
- 调整展开图的位置和方向调节；
- 选择和定义衬砌表面缺陷或关注区域，自动计算长度、宽度、面积等参数。

- 选择缺陷类型和等级应用标准；
- 输入缺陷类型注释等；

4.9 缺陷分析的功能

- 自定义缺陷类型，包括：龟裂、掉块、裂纹和渗水以及表面状态不均匀等；
- 自定义缺陷的等级，并通过颜色区分；
- 定义缺陷边界，软件会自动计算裂纹长度、宽度以及缺陷面积；
- 自动分析超限数据并实时报警；
- 缺陷的分类和统计；
- 按照用户标准或定义的统计原则输出缺陷报告；

4.10 人工智能应用 (AI)

针对隧道衬砌表面展开图数据，软件应用了人工智能模块，人工智能模块嵌入到隧道分析软件中，用户通过人工智能，可快速得到隧道表面状态的初步分析结果，鉴于隧道的类型和表面状态存在一定差别，人工智能分析的结果需要用户进行确认操作。

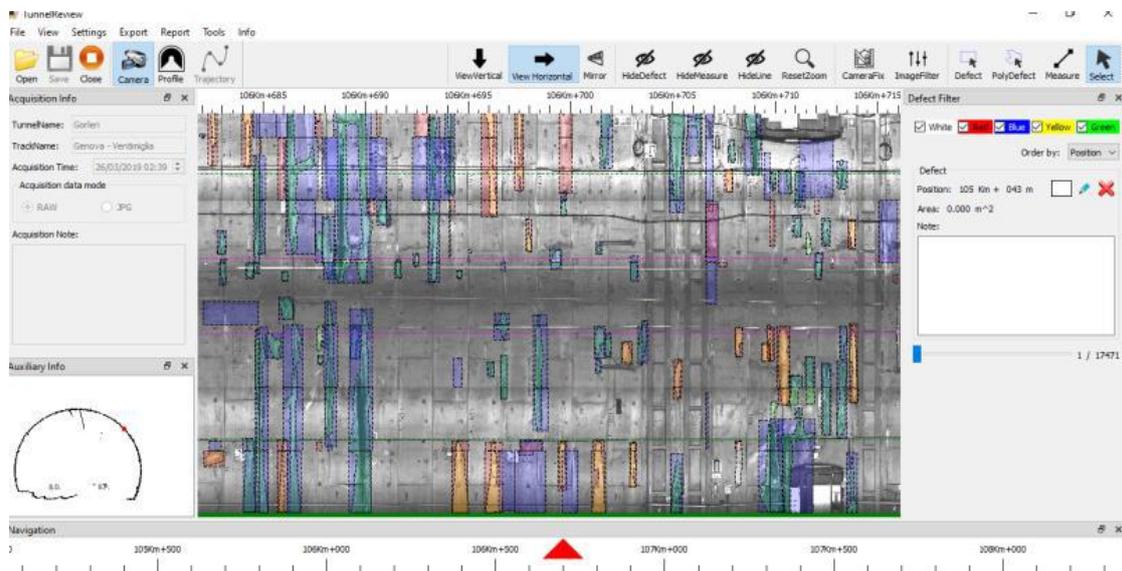


图 16 – 应用人工智能的分析结果

经过用户确认的缺陷存入缺陷数据库，未经过人工确认的缺陷存入疑似数据库，经过用户确认非隧道缺陷的数据存入正常数据库。用户确认的工作量随着数据库内容的不断丰富将会有很大程度上的降低。

4.11 数据报告

检测数据报告包括：隧道衬砌表面缺陷分析图、CAD 格式的隧道衬砌缺陷报告、隧道衬砌表面缺陷统计报告以及隧道轮廓超限图和报告列表。

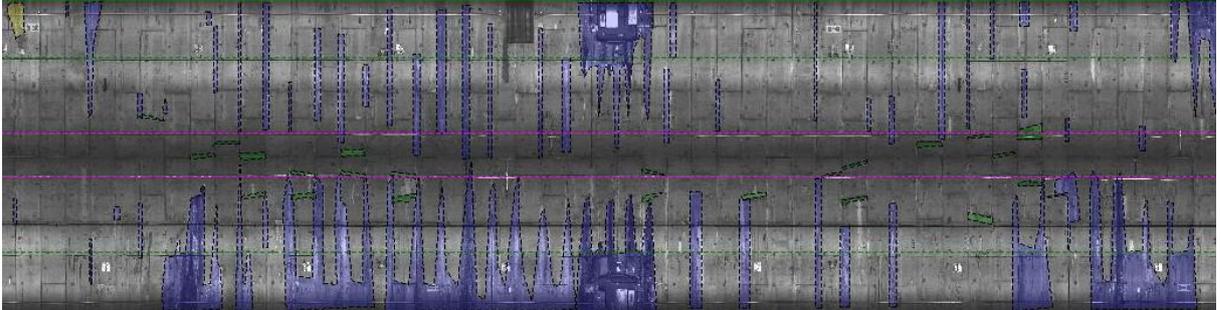


图 17 – 隧道衬砌表面缺陷分析图

隧道衬砌表面分析图基于一张隧道衬砌的表面图像，图像长度为隧道长度，软件按照显示能力自动分割。分析图中的隧道缺陷都经过用户确认，并按照隧道缺陷标准分类，可随时输出到 CAD 格式的缺陷报告中。

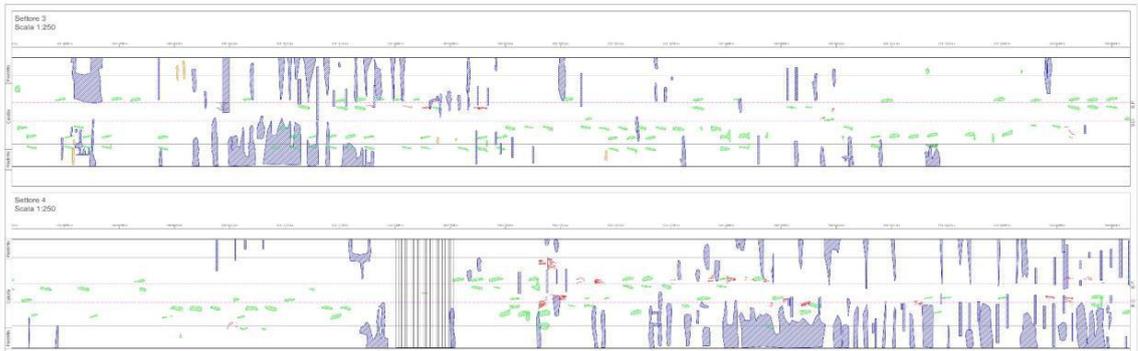


图 18 – CAD 格式的缺陷报告

CAD 格式的缺陷报告配有里程信息，报告中的不同颜色代表了不同等级和类型的缺陷，同时报告还配有缺陷名称以及注释信息，方便用户建立统计资料。

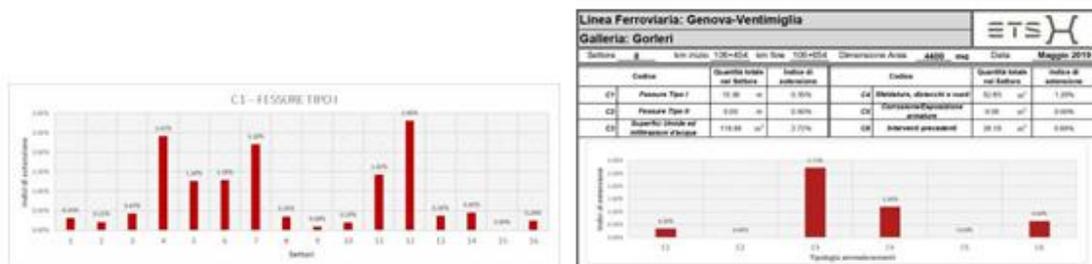


图 19 – 缺陷统计报告

按照用户事前定义好的缺陷类型、缺陷等级以及软件计算的参数结果（例如：长度、宽度或面积），可方便地输出各种类型的缺陷统计报告，包括按照不同的缺陷种类、等级、计算参数值等各种统计报告。上图中即为隧道表面缺陷 C1 类隧道衬砌掉块的统计报告样例。

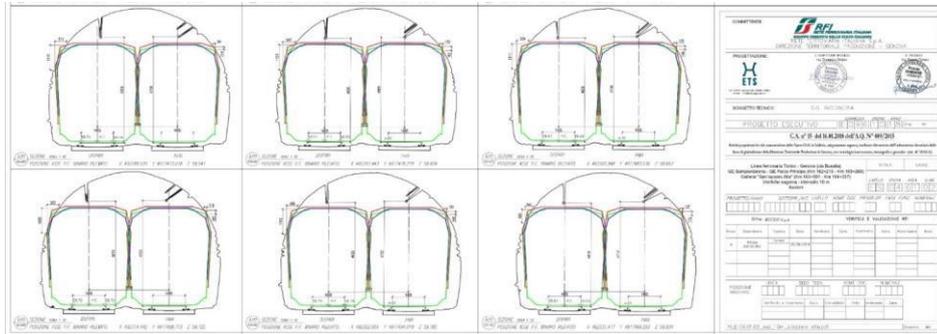


图 20 – 隧道轮廓和超限分析报告

除了隧道衬砌表面缺陷的检测报告外，软件还可以为用户提供隧道廓形尺寸分析报告，该分析报告基于用户的隧道管理设标准以及铁路限界标准定制。上图为提供意大利铁路的分析报告样例。针对超限的部分，用户还可以通过浏览衬砌表面展开图的相应位置，了解超限的内容。

除上述报告外，用户还可以定制符合其管理规范的缺陷报告，包括快速维修报告，以下为意大利铁路定制的一种快速维修报告。

Position	Note	Area(m ²)	Profile
1Km+636m Pari	Macchia di umidità: presenza di umidità sulla superficie del cis reso visibile anche quando l'acqua non è presente per effetto dell'azione chimica dei sali in essa disciolti ma visibili dalle macchie presenti sul cis asciutto.	37.285	
1Km+647m Pari	Macchia di umidità: presenza di umidità sulla superficie del cis reso visibile anche quando l'acqua non è presente per effetto dell'azione chimica dei sali in essa disciolti ma visibili dalle macchie presenti sul cis asciutto.	18.393	
1Km+672m Pari	Fessure verticali: presenza di fessure con andamento prevalentemente verticale riscontrabili sulla superficie degli elementi strutturali in cis	5.465	
1Km+676m Pari	Percolazione attraverso fessure e giunti: passaggio di acqua attraverso fessure, giunti, nicchie con conseguente presenza di materiale organico (ad. es. muschio)	0.848	
1Km+682m Pari	Fessure verticali: presenza di fessure con andamento prevalentemente verticale riscontrabili sulla superficie degli elementi strutturali in cis	10.429	
1Km+697m Dispani	Fessure verticali: presenza di fessure con andamento prevalentemente verticale riscontrabili sulla superficie degli elementi strutturali in cis	19.989	

图 21 – 用户定制的快速维修报告

该维修报告的目的是帮助维修人员快速到现场找到缺陷，图中的内容包括公里标信息、隧道缺陷的位置图，以及相关缺陷说明和维修要求说明。

5. 隧道缺陷标准和技术服务

长期以来，针对铁路隧道的检测工作耗费了大量人力物力，通常是采用手持式检测仪器和人工检测，效率低且存在人为因素，检测数据不能有效存储和分类，数据历史和检测历史不能有效保存和追溯。为此，本技术方案根据国际上铁路隧道管理的经验，尤其是欧洲铁路的管理经验，提出生产厂家协助用户建立隧道缺陷管理标准、高效利用检测数据的技术服务理念和内容。

5.1 建立检测数据的管理数据库

检测数据和检测报告的数字化管理和存储是当今世界铁路隧道运营商正在努力完成的工作，管理隧道状态大数据将帮助用户了解和分析隧道的演变历程、隧道缺陷形成的原因、掌握隧道发展规律，为将来预防性养护维修方案的可行性研究和实施奠定基础。

5.2 建立隧道缺陷管理标准

基于意大利铁路公司的经验，检测设备生产厂家协助用户建立隧道缺陷管理标准，并将该标准应用到检测数据的分析中，从而提高分析效率和数据报告的实用性。

5.3 缺陷分析服务

鉴于用户可能缺少专业的技术人员分析检测数据，检测设备生产厂家可提供检测数据的分析服务或对用户人员的培训服务，以达到满足检测设备快速和高效应用的目的。

5.4 检测报告的定制

尽管各国铁路都本着安全管理和高效运营的目的，但各国铁路针对线路和隧道的管理标准存在很大区别，为了更好地利用检测数据为养护维修和安全运营服务，这里检测设备生产厂家可以按照用户的管理体系和维修机制，定制数字化的检测报告。检测报告可通过手机网络直接发给用户的管理部门或进入用户的管理体系。

5.5 检测数据的拓展应用

检测数据不仅能展示数字化的二维隧道数据，还能以三维数据的方式展示并输出到其它广泛应用的三维数据软件中，检测设备生产厂家可提供相关的技术服务协助用户转换、存储、展示、分析、处理各类隧道检测数据。例如：

- 建立 CAD 格式的隧道模型；

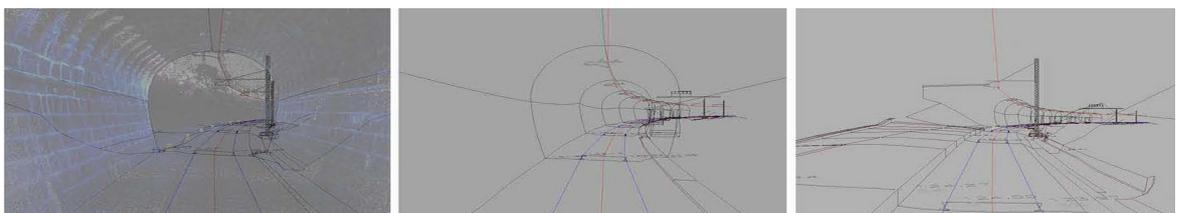


图 22 – CAD 格式的隧道模型

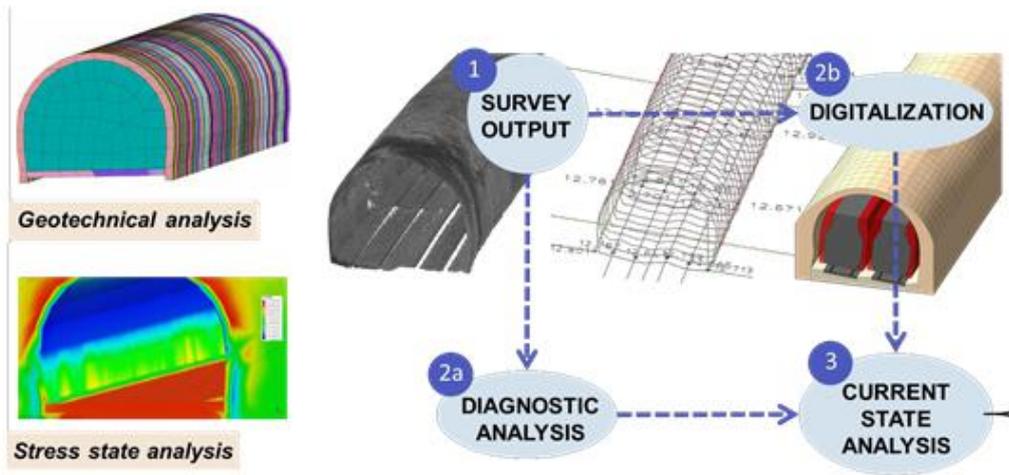


图 23 - 隧道结构分析和应力分析

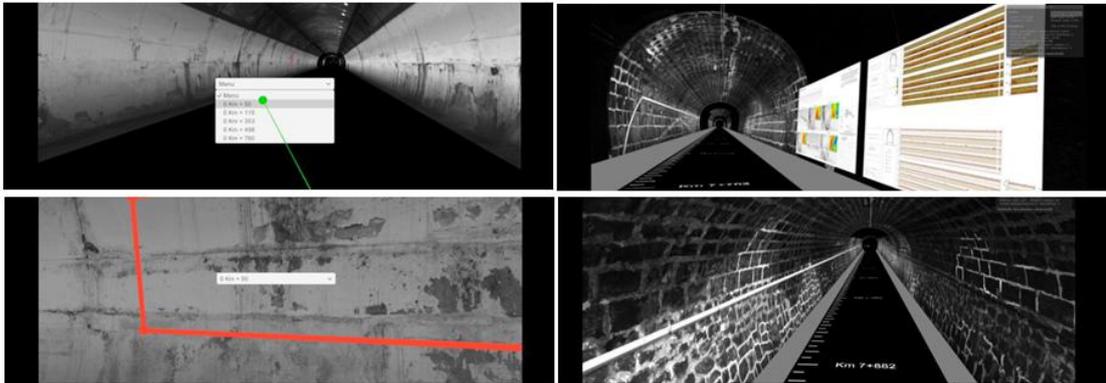


图 24 - 三维隧道图像 VR 实景分析和 VR 数据展示

检测数据可输出到商用的 VR 软件，通过 VR 镜，用户利用虚拟现实场景，如同身临其境一般检查和浏览隧道的状态，在展示的虚拟显示场景中，配有明显的隧道的里程信息，方便用户观察和了解各种设施状态以及缺陷的位置、维修工作的质量等。最终达到用户在自己的管理系统中，可调用和查看近期检测的管内每条隧道的虚拟现实场景，如同身临其境一般，通过 VR 数据的形式，掌握隧道的实际情况。



图 25 - 应用 VR 虚拟现实场景检查隧道和设施状态